

法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

多目的最適化による製品ライフサイクル設計手法

著者	風間 純樹
出版者	法政大学大学院理工学・工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	57
ページ	1-8
発行年	2016-03-24
URL	http://hdl.handle.net/10114/12259

多目的最適化による 製品ライフサイクル設計手法

A PRODUCT LIFECYCLE DESIGN METHOD
BY MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION

風間純樹

Junki KAZAMA

指導教員 木村文彦

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

This study proposes an optimum system design method that especially considers product lifecycles, and aims to help designers make effective decisions during the product design phase. By considering and estimating all lifecycle factors of cost and environmental impact in addition to the performance of the product, this method facilitates development of optimum design solutions that incorporate requirements pertaining to the product's entire lifecycle. In the proposed lifecycle design optimization method, the relationships among the product performance, the lifecycle cost which includes the manufacturing cost, and the lifecycle environmental impact are evaluated as a multiobjective optimization problem.

Key Words : *Product Lifecycle, Multiobjective Optimization, Product Design, Environmental Impact*

1. 緒論

種々ある環境問題の根本的な解決のためには、資源やエネルギーの消費を少なくし使用済み製品の再使用やリサイクルを行うという循環型社会に移行する必要がある。その中で製造業においては、製品のライフサイクルの各段階における様々な評価項目を織り込んで製品設計すること、すなわちライフサイクル設計 (Life Cycle Design : LCD) が求められている[1].

ライフサイクル設計とは、製品を設計する際に、どのような製品ライフサイクル戦略を採り、どのような製品アーキテクチャにすれば、環境負荷を低減させつつ、同時に企業戦略を実現できるかを検討するための手段である[2]. ライフサイクル設計の評価項目には競合関係 (トレードオフ関係) になっているものがあり、主なものとしては最も重要な評価項目のひとつであるコストと環境影響の関係がある。いかに環境影響が低いライフサイクル戦略であっても経営的に持続可能なビジネス戦略を伴っていなければ実現不可能である[3].

そこで本研究では、ライフサイクル設計の評価項目として製品性能、ライフサイクルコスト、環境影響を取り上げ、それらを最適化するために多目的最適化問題を解き、トレードオフ関係を定量的に解析する。そして環境負荷低減と経営的に持続可能なビジネス戦略との両立を可能とするための設計支援手法を提案することを目指す。

2. 研究で用いる基礎的手法

(1) LCA

LCA (Life Cycle Assessment) は、対象とする製品やサービスを生み出す資源の採掘から素材製造、生産だけでなく、製品の使用・廃棄段階まで、ライフサイクル全体を考慮し、資源消費量や排出物量を計量するとともに、その環境への影響を評価する手法である。LCA の結果は、環境負荷低減を行うための意思決定に活用される。すなわち、LCA は環境への負荷を削減するための判断材料を提供する意思決定ツールの一つである[4].

本研究では、LCA 支援ソフトウェア MiLCA を用いて環境負荷量の算出を行った。

(2) GA

GA (Genetic Algorithm) とは、生物が環境に適応して進化していく過程を工学的に模倣した学習的アルゴリズムである。自然界における生物の進化過程では、ある世代を形成している個体の集合の中で環境に適応した個体が高い確率で生き残り、次の世代に子を残す。このメカニズムをモデル化し、環境に対して最もよく適応した個体、すなわち目的関数に対して最適値を与えるような解を求めようというのが GA の概念である。

GA の探索は確率的・多点探索である点を特徴とする。GA は対象とする問題の解集合を保持し、確率的に解を改変する操作により試行解を生成する。そして、淘汰と呼

ばれる良い解で集合を置き換える操作の反復によって適合度の高い解を探索する[5].

本研究では、MATLAB の最適化拡張パッケージである Global Optimization Toolbox を用いて、GA を実行した。

3. 方法論

本手法の流れの概略図を Fig. 1 に示す。

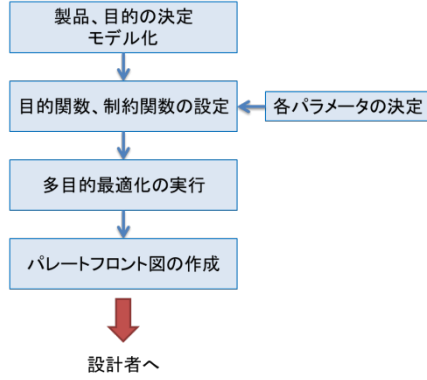


Fig. 1 Flow of the optimal design method

製品性能、ライフサイクルコスト、環境負荷を考慮したライフサイクル設計を行うために、まず対象製品と目的の決定をし、製品のモデル化を行う。次にそれをもとに評価関数と制約関数を決定する。評価関数は、設計変数とそれに掛かる定数で構成される。この定数は、変数と共に計算を行い、評価項目を表現するためのパラメータであり、例えば単位質量あたりの材料費などがこれに該当する。したがってこの定数についてデータを収集、あるいは仮定を行い、決定する必要がある。制約関数は、多目的最適化を行う上で変数へ課される条件や評価関数の範囲などがある場合に設定を行う。次に決定した目的関数と制約関数をもとに多目的最適化の実行を行う。これにより、設計変数の値やそれに対応した各評価項目値が結果として算出される。これをもとにパレートフロント図を作成し、設計者へと提示することで、設計者は各評価項目の値においてバランスのとれた設計案を作成することができるという流れとなる。

(1) 評価項目の定式化

本手法では、評価項目として大きく分けて製品性能、ライフサイクルコスト、環境負荷の3点について最適化を行う。製品性能は設計時の評価項目の中でも最も基本的なものであり、これは使用の段階においてユーザーが製品に望む価値全般である。工作機械や作業用ロボットのような産業用機械では、精度、能率、稼働エネルギーなどがある。これらを定量的に評価し数値化したものを目的関数 F_j とする。ここで、 j は評価したい製品性能の項目を表す。ただし、評価項目の数が多い場合はパレートフロントから設計案を作成する際に複雑になりすぎるため、重み付け係数を用いるなどで統合して評価指標を減らすことが必要となる。

ライフサイクルコストは製品のライフサイクルの各段階にかかる費用のことである。近年家電リサイクル法や自動車リサイクル法の制定などにより廃棄、再生の段階の費用をメーカーやユーザーが負担する動きがあり、ライフサイクル全体の費用を社会全体として負担することになりつつある。つまり、各費用の合計を少なくすることが求められている側面があるので、ここではトータルのライフサイクルコスト C_{total} を、企画費 C_{plan} 、設計費 C_{design} 、製造費 $C_{manufacture}$ 、輸送費 $C_{transport}$ 、使用費 C_{use} 、保守費 $C_{maintenance}$ 、廃棄費 $C_{disposal}$ 、再生費 $C_{recycle}$ の和として次式のように設定する。

$$C_{total} = C_{plan} + C_{design} + C_{manufacture} + C_{transport} + C_{use} + C_{maintenance} + C_{disposal} + C_{recycle} \quad (1)$$

環境影響は持続可能な発展のための評価項目である。環境影響としての細かな評価項目は環境問題の数だけあり、全てを考慮することは非常に困難である。そこで、本手法の実行者は対象製品に関する主な環境影響項目を少数選択するか、製品性能の項目と同様に重み付け係数を用いるなどで統合して評価指標を減らすことが必要となる。また、環境負荷量も製品の生涯費用と同様であり、製品のライフサイクルの各段階における環境負荷量全てを社会全体として削減していく動きがある。そこで、トータルの環境影響 E_{total} を、企画の環境影響 E_{plan} 、設計の環境影響 E_{design} 、製造の環境影響 $E_{manufacture}$ 、輸送の環境影響 $E_{transport}$ 、使用の環境影響 E_{use} 、保守の環境影響 $E_{maintenance}$ 、廃棄の環境影響 $E_{disposal}$ 、再生の環境影響 $E_{recycle}$ の和として次式のように設定する。

$$E_{total} = E_{plan} + E_{design} + E_{manufacture} + E_{transport} + E_{use} + E_{maintenance} + E_{disposal} + E_{recycle} \quad (2)$$

(2) 多目的最適化の設定

定義した製品性能 F_j 、トータルのライフサイクルコスト C_{total} およびトータルの環境影響 E_{total} の3つの目的関数について多目的最適化を行う。これをまとめると次式のようになる。

$$\begin{aligned} &\text{find} && x_i \\ &\text{minimize} && [F_j(x_i), C_{total}(x_i), E_{total}(x_i)] \\ &\text{subject to} && g_k(x_i, p_l) \leq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 x_i は設計変数、 g_k は制約関数、 p_l は設計パラメータである。設計変数は部材の寸法や形状、材質、部品の種類などに加えて、製品のライフサイクルオプション(部品の再使用、材料の再生、廃棄などを行うかどうか)も含まれる。制約条件は、設計変数の制約や目的関数の数値目標など最低限度満たさなければならない条件がある場合に設定しておく。

4. ケーススタディ

本手法を比較的簡単な構造からなる製品に適用して有効性を検証する。対象製品は工作機械における主軸系とし、使用される材質は炭素鋼、クロムモリブデン鋼、ステンレス鋼の3種とした。また、ケーススタディの問題の拡張として、6変数の場合と3目的関数の場合についても考え、同様に本手法を適用して検証を行った。

(1) 適用例①：一様断面中空円筒軸

対象製品を一様断面の中空円筒軸とし、その主要構造をFig. 2のようにモデル化した。

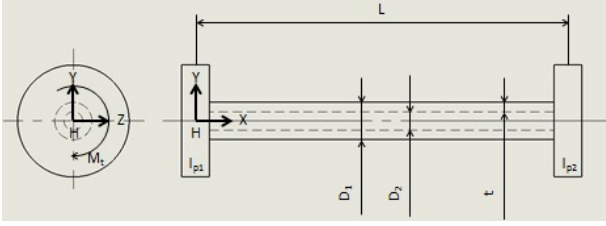


Fig. 2 Model of cylindrical axis

この主軸系は、一様断面の中空円筒軸とフライスカッタに相当する左端円盤、フライホイールに相当する右端円盤によって構成される。軸の外径、内径はそれぞれ D_1 [m], D_2 [m] とし、肉厚 t [m], 軸の全長を L [m] とした。

この主軸系の稼働時に、切削点に相当する H 点に加わる代表的な外力として、ねじりモーメント M_t [N・m] がある。この製品の性能に関する評価項目としてねじりモーメントによるねじりの静コンプライアンス F_s [rad/N・m] を取り上げる。また、他の評価項目としてライフサイクルコスト C_{total} [yen] と環境影響 E_{total} [kg-CO₂e] を用いる。ただし本適用例では製造、輸送、廃棄、リサイクルの段階のみ適用する。設計変数は、外径 D_1 、内径 D_2 、使用材質の3種類とする。設計変数の制約条件は $D_1 - D_{max} \leq 0$, $D_{min} - D_2 \leq 0$, $2t_{min} - (D_1 - D_2) \leq 0$ である。

a) 評価関数

ねじりの静コンプライアンス F_s は、加わったねじりモーメント M_t あたりのねじれ角 φ [rad] と定義される。 φ は Fig. 2 における X 軸に関する円筒軸の断面二次極モーメント I_p [m⁴], 材質の横弾性係数 G [N/m²] より求めることができ、 I_p は外径 D_1 、内径 D_2 により決定される。最終的に F_s は以下の式より求まる [6]。

$$F_s = \frac{32L}{\pi G(D_1^4 - D_2^4)} \quad (4)$$

ライフサイクルコスト C_{total} は、製造費 $C_{manufacture}$ [yen], 輸送費 $C_{transport}$ [yen], 廃棄費 $C_{disposal}$ [yen], リサイクル費 $C_{recycle}$ [yen] の和で表す。

$$C_{total} = C_{manufacture} + C_{transport} + C_{disposal} + C_{recycle} \quad (5)$$

$C_{manufacture}$ は材料費 $C_{material}$ [yen] と加工費

$C_{process}$ [yen] の和とする。

$$C_{manufacture} = C_{material} + C_{process} \quad (6)$$

また C_{total} の各項はそれぞれに対応する軸の質量 $M_{manufacture}$ [kg], M_{total} [kg], $M_{disposal}$ [kg], $M_{recycle}$ [kg] と材質の単位質量あたりのコスト c_{mat} [yen/kg], c_{pro} [yen/kg], c_{tra} [yen/kg], c_{dis} [yen/kg], c_{rec} [yen/kg] の積によって計算する。

$$\begin{aligned} C_{material} &= c_{mat} \times M_{manufacture} \\ C_{process} &= c_{pro} \times M_{manufacture} \\ C_{transport} &= c_{tra} \times M_{total} \\ C_{disposal} &= c_{dis} \times M_{disposal} \\ C_{recycle} &= c_{rec} \times M_{recycle} \end{aligned} \quad (7)$$

また各質量は構成材質の密度 ρ [kg/m³] とリサイクル率 R [%] を用いてそれぞれ次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} M_{total} &= \frac{\pi L \rho}{4} (D_1^2 - D_2^2) \\ M_{recycle} &= R \times M_{total} \\ M_{manufacture} &= M_{disposal} = M_{total} - M_{recycle} \\ &= M_{total} - (R \times M_{total}) = (1 - R) M_{total} \end{aligned} \quad (8)$$

環境影響は LCA 実施により算出する。影響領域は地球温暖化を選択し GWP (Global Warming Potential) により特性化を行う。したがって単位は [kg-CO₂e] となる。

環境影響 E_{total} は、製造、輸送、廃棄、リサイクルの各段階における環境負荷量 $E_{manufacture}$ [kg-CO₂e], $E_{transport}$ [kg-CO₂e], $E_{disposal}$ [kg-CO₂e], $E_{recycle}$ [kg-CO₂e] の合計とする。

$$E_{total} = E_{manufacture} + E_{transport} + E_{disposal} + E_{recycle} \quad (9)$$

また E_{total} の各項はそれぞれに対応する軸の質量 $M_{manufacture}$, M_{total} , $M_{disposal}$, $M_{recycle}$ と材質の単位質量あたりの環境影響 e_{man} [kg-CO₂e/kg], e_{tra} [kg-CO₂e/kg], e_{dis} [kg-CO₂e/kg], e_{rec} [kg-CO₂e/kg] の積により計算する。

$$\begin{aligned} E_{manufacture} &= e_{man} \times M_{manufacture} \\ E_{transport} &= e_{tra} \times M_{total} \\ E_{disposal} &= e_{dis} \times M_{disposal} \\ E_{recycle} &= e_{rec} \times M_{recycle} \end{aligned} \quad (10)$$

b) 各種設定値

主軸の全長 L は機能的な制約から 1.0 [m] と与えられているものとする。同様に最大外径 D_{max} は 0.15 [m], 最小内径 D_{min} は 0.05 [m], 最小肉厚 t_{min} は 0.01 [m] とする。また、その他の各材質における各種設定値を Table 1 に示す。

Table 1 Material constants

	単位	炭素鋼	クロム モリブデン鋼	ステンレス 鋼
G	N/m ²	7.9×10^{10}	8.2×10^{10}	7.5×10^{10}
ρ	kg/m ³	7900	7760	7640
R	%	0.9	0.7	0.8
c_{mat}	yen/kg	130	170	310
c_{pro}		140	130	150
c_{tra}		20	20	20
c_{dis}		40	40	40
c_{rec}		300	350	470
e_{man}	kg-CO ₂ e	2.64	2.754	4.775
e_{tra}		0.1187	0.1187	0.1187
e_{dis}		0.01429	0.01429	0.01429
e_{rec}		4.426	4.426	4.426

c) 結果

パレート最適解は最終世代の個体の集合として表される。 F_s の値が昇順になるよう各個体をソートしてインデックスを振り、変数の変化の様子をグラフ化したものをFig. 3に示す。 F_s と C_{total} のパレート最適解をFig. 4に、 F_s と E_{total} のパレート最適解をFig. 5に示す。

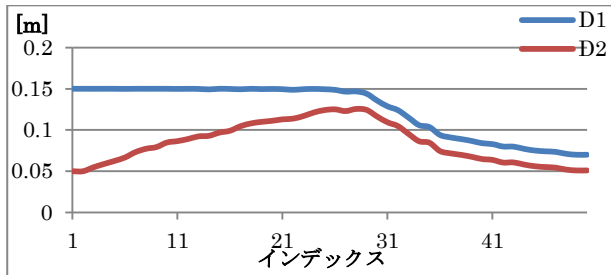
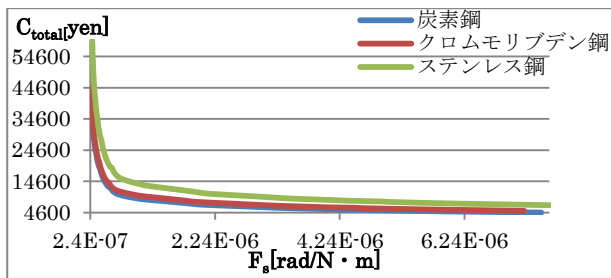
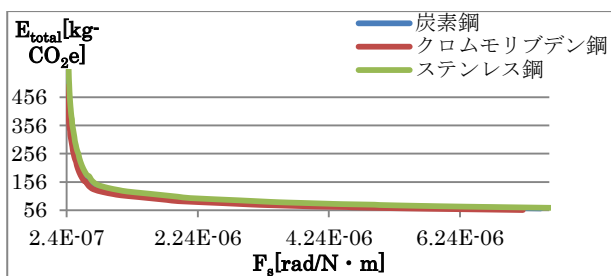


Fig. 3 Changes of design variables

Fig. 4 Pareto optimum solution of F_s and C_{total} Fig. 5 Pareto optimum solution of F_s and E_{total}

本適用例では3つの評価関数を設定したので、本来は3目的最適化問題となる。しかし、 C_{total} と E_{total} の各項目は全て質量に依存すると設定した。そのため2つの評価項目は完全に比例し、競合関係にならない。

各材質を比較すると、 F_s と C_{total} のパレート最適解では、大部分の解域で炭素鋼が最も優れた解を出している。これは炭素鋼のコストにかかる係数が他と比較し低いことに起因する。横弾性係数Gが大きいほど F_s は小さくなるが、これはクロムモリブデン鋼が最も大きい。Gによる最適解への影響と比較してコストにかかる係数が最適解へ与える影響の方が大きい、つまり支配的であると言える。また、解域が広くグラフから確認する事は困難であるが、 C_{total} の値が大きい解域の極一部で炭素鋼とクロムモリブデン鋼の優劣が入れ替わっている。つまり C_{total} の値が大きくなるほど最適解のGへ依存度が高くなると言える。

F_s と E_{total} のパレート最適解ではクロムモリブデン鋼が最も優れた解を出している。これはクロムモリブデン鋼のGの値が最も大きいことに起因している。またクロムモリブデン鋼の環境影響にかかる係数が比較的低いということも要因である。環境影響にかかる各係数を比較すると炭素鋼が最も低い。しかしその値には密度やリサイクル率などが積算される。その結果クロムモリブデン鋼の方が環境影響にかかる係数が小さくなるということだ。

D_1 と D_2 の変化の様子を見ると最大外径かつ最小内径から内径が広がっていき、最大内径へと達すると最小肉厚を保ったまま外径内径が縮まる。これは外径が縮まるよりも内径が広がることによる各評価項目の変化外径が優れている、つまり内径が支配的であることを示す。

(2) 適用例②：段付主軸

適用例①からの問題の拡張として、段付き主軸を取り上げ、6変数の場合について本手法を適用し検証を行う。

対象製品を段付き主軸とし、その主要構造をFig. 6のようにモデル化した。

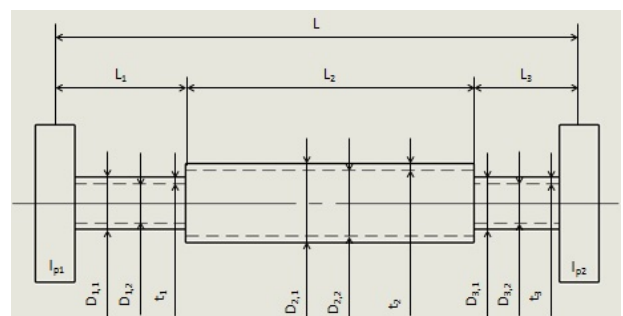


Fig. 6 Model of multi-diameter axis

外径 $D_{1,1}$ [m]、内径 $D_{1,2}$ [m]をもつ段の長さを L_1 [m]、外径 $D_{2,1}$ [m]、内径 $D_{2,2}$ [m]をもつ段の長さを L_2 [m]、外径 $D_{3,1}$ [m]、内径 $D_{3,2}$ [m]をもつ段の長さを L_3 [m]とした。また、それぞれの肉厚を t_1 [m]、 t_2 [m]、 t_3 [m]、軸の全長を L [m]とした。制約条件は $D_{1,1} - D_{1max} \leq 0$ 、 $D_{1min} - D_{1,2} \leq 0$ 、

$$2t_{1min} - (D_{1,1} - D_{1,2}) \leq 0, \quad D_{2,1} - D_{2max} \leq 0, \quad D_{2min} - D_{2,2} \leq 0, \quad 2t_{2min} - (D_{2,1} - D_{2,2}) \leq 0, \quad D_{3,1} - D_{3max} \leq 0, \quad D_{3min} - D_{3,2} \leq 0, \quad 2t_{3min} - (D_{3,1} - D_{3,2}) \leq 0 \text{である.}$$

a) 評価関数と各種設定値

評価項目は適用例①と同様に F_s , C_{total} , E_{total} の3項目を取り上げる. 以下には適用例①からの変更点を記す.

本適用例における F_s を定式化すると以下ようになる.

$$F_s = \frac{32L_1}{\pi G(D_{1,1}^4 - D_{1,2}^4)} + \frac{32L_2}{\pi G(D_{2,1}^4 - D_{2,2}^4)} + \frac{32L_3}{\pi G(D_{3,1}^4 - D_{3,2}^4)} \quad (11)$$

適用例①と同様に C_{total} , E_{total} は全て M_{total} によって決定されるものとする. M_{total} を本適用例のモデルに対応するものに置き換える. 定式化したものを以下に示す.

$$M_{total} = \frac{\pi \rho}{4} \{ (D_{1,1}^2 - D_{1,2}^2)L_1 + (D_{2,1}^2 - D_{2,2}^2)L_2 + (D_{3,1}^2 - D_{3,2}^2)L_3 \} \quad (12)$$

適用例①と同様に, 機能的な制約から軸の全長 L は1.0[m]と与えられているものとする. L_1 , L_2 , L_3 はそれぞれ0.2[m], 0.55[m], 0.25[m]とした. また, D_{1max} は0.1[m], D_{1min} は0.05[m], D_{2max} は0.15[m], D_{2min} は0.1[m], D_{3max} は0.1[m], D_{3min} は0.05[m]とし, それぞれの最小肉厚 t_{1min} , t_{2min} , t_{3min} は一様に0.01[m]とした.

その他の設定値については, Table 1と同一である.

b) 結果

F_s の値が昇順になるよう各個体をソートしてインデックスを振り, 変数の変化の様子をグラフ化したものをFig. 7に示す. F_s と C_{total} のパレート最適解をFig. 8に示す.

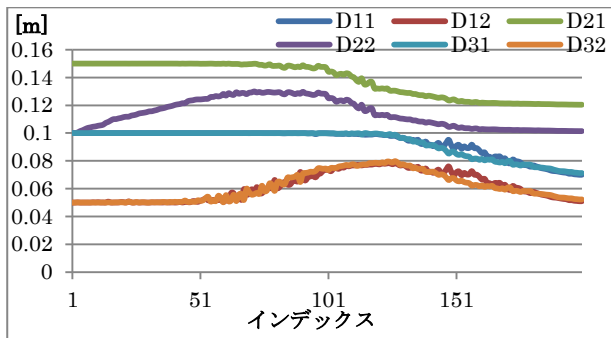


Fig. 7 Changes of design variables

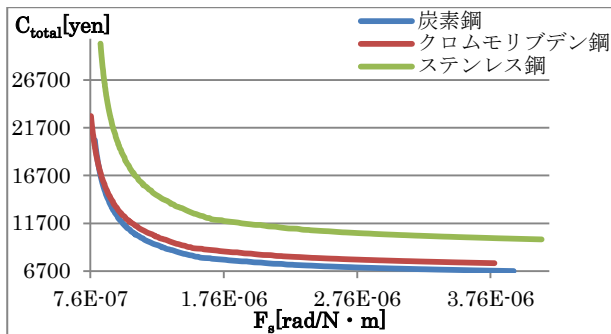


Fig. 8 Pareto optimum solution of F_s and C_{total}

適用例①と同様に C_{total} と E_{total} の各項目は全て質量に依存すると設定したため2項目間は完全に比例する.

各材質の解の優劣も適用例①とほぼ同一である. F_s と C_{total} のパレート最適解では, 制約条件の変更により解域が狭まったことを受け, 炭素鋼とクロムモリブデン鋼の解の優劣の入れ替わりを明確に確認することができる.

本適用例の適用例①からの大きな変更点である変数の変化を見ると, 長さ L_1 , L_2 , L_3 における各段の外径と内径の変化には変化の優先度がある. F_s が昇順になるよう変数をソートし, 変化の様子をまとめたものを以下に示す.

- ① 全ての外径が最大値, 全ての内径が最小値 (F_s 最小値)
- ② 長さ L_2 の段における内径が広がり始める
- ③ 長さ L_1 , L_3 の段における内径が広がり始める
- ④ L_2 部分の肉厚が最小に達し $D_{2,1}$ と $D_{2,2}$ が最小肉厚を保ちつつ縮み始める
- ⑤ L_1 , L_3 部分の肉厚が最小に達し $D_{1,1}$ と $D_{1,2}$, $D_{3,1}$ と $D_{3,2}$ が最小肉厚を保ちつつ縮み始める
- ⑥ 長さ L_2 の段の外径内径が最小値となり変化がとまる
- ⑦ 全ての外径と全ての内径が最小値 (F_s 最大値)

このような優先度の違いは L_2 部分の段を意図的に出っ張らせるような制約条件に起因するものだと考えられる. はじめは L_2 部分の段の変化による評価値の変化量が大きく優先度が高い. しかし L_2 部分の段の変化が進むにつれ, 他の部分の段の変化による評価値の変化量が追いついたことで変化が始まるということである.

(3) 適用例③: 単位面積あたりの加工費

適用例①からの問題の拡張として C_{total} を軸の表面積 S [m²]に依存するものとして設定することで C_{total} と E_{total} の比例関係を解消し, 3目的最適化問題として検証を行う.

対象製品のモデルは適用例①と同一としFig. 2のモデル図を用いる. 変数や制約条件も適用例①と同様である.

a) 評価関数と各種設定値

評価項目は適用例①と同様に F_s , C_{total} , E_{total} の3項目を取り上げる. 以下には適用例①からの変更点を記す.

F_s は適用例①と完全に同一であるため説明を割愛する.

C_{total} は製造段階の加工費 $C_{process}$ において変更を加える. $C_{process}$ は本適用例では円筒軸の表面積 S と材質の単位面積あたりの加工費 c_{pro} [yen/m²]の積によって計算する.

$$C_{process} = c_{pro} \times S \quad (13)$$

また表面積 S は次式のように求めることができる.

$$S = L\pi(D_1 + D_2) \quad (14)$$

また本適用例では F_s , C_{total} , E_{total} による明確な3目的最適化問題を確立させそれを検証するため, ライフサイクルにおける他の段階は考慮しないものとした.

環境影響についても加工による環境負荷のみ取り上げることとした. 加工の環境影響 $E_{process}$ [kg-CO₂e]は M_{total}

と材質の単位質量あたりの加工にかかる環境負荷量 e_{pro} [kg-CO₂e/kg] の積をもとに評価する。

$$E_{process} = e_{pro} \times M_{total} \quad (15)$$

c_{pro} は炭素鋼, クロムモリブデン鋼, ステンレス鋼それぞれ 35000 [yen/m²], 30000 [yen/m²], 40000 [yen/m²] とした。 e_{pro} はすべての材質が同様の工程により加工されると仮定し, 一様に 0.7689 [kg-CO₂e/kg] とした。

その他の設定値については, Table 1 と同一である。

b) 結果

C_{total} の値が昇順になるよう各個体をソートしてインデックスを振り, 変数の変化の様子をグラフ化したものを Fig. 9 に示す。 F_s と C_{total} のパレート最適解を Fig. 10 に, F_s と E_{total} のパレート最適解を Fig. 11 に, C_{total} と E_{total} のパレート最適解を Fig. 12 に示す。炭素鋼における 3 つの評価項目のパレート最適解を 3 次元グラフにプロットしたものを Fig. 13 に示す。

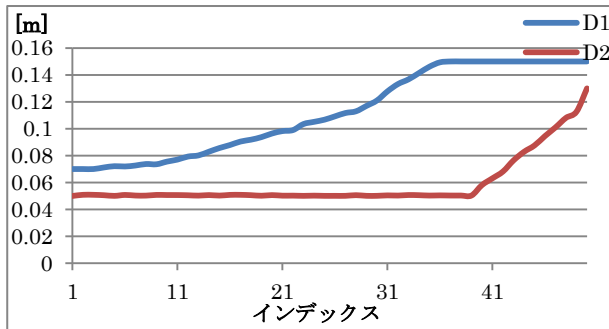


Fig. 9 Changes of design variables

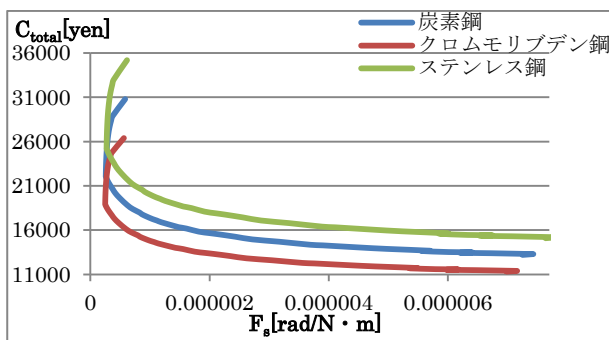


Fig. 10 Pareto optimum solution of F_s and C_{total}

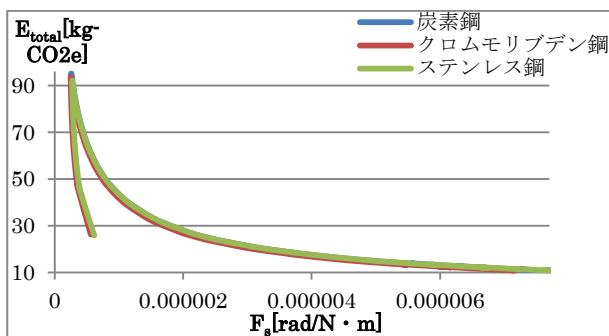


Fig. 11 Pareto optimum solution of F_s and E_{total}

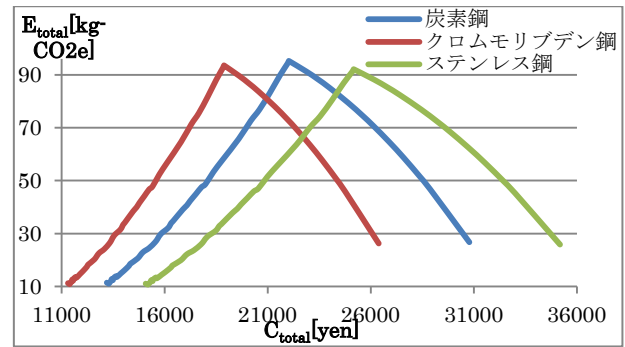


Fig. 12 Pareto optimum solution of C_{total} and E_{total}

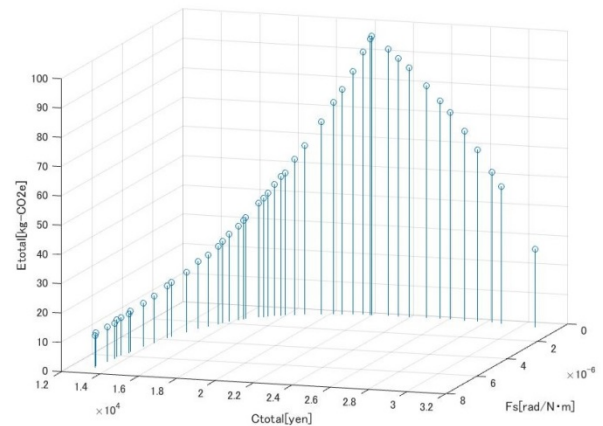


Fig. 13 Pareto optimum solution of 3 functions

各パレート最適解を見ると領域によっては結果が逆行しているように見える。しかしその 2 項目間で結果が逆行していても, 残り一つの評価項目を加えると最適解として成り立つ。GA による多目的最適化では全ての評価項目が劣っていない個体を非劣解として残していくため, 2 つの評価項目で劣っていても残り一つの評価項目が優れていれば最適解となる。それが本適用例に顕著に表れた。

各材質を比較すると, F_s と C_{total} のパレート最適解においてはクロムモリブデン鋼が最も優れた解を出している。これはクロムモリブデン鋼の単位面積あたりの加工費 c_{pro} を低く設定したことが効いている。どの材質も同じようなグラフの変化をし, C_{total} 軸方向に平行移動したような図になっている。つまり加工費 c_{pro} がこの C_{total} 軸方向の平行移動量となっていることが理解できる。

F_s と E_{total} のパレート最適解においても, 差はわずかではあるがクロムモリブデン鋼が最も優れた解を出している。これは適用例①と同様にクロムモリブデン鋼の横弾性係数 G が大きいことに起因していると考えられる。 e_{pro} の値はどの材質も同一であり密度 ρ が一番低いのはステンレス鋼であることから, 環境影響はステンレス鋼が最も優秀であるように見えるが, その利を越えてクロムモリブデン鋼の G の値が優れているということである。

C_{total} と E_{total} のパレート最適解においても各材質のグラフが C_{total} 軸方向に平行移動したような図になっている。 c_{pro} の値の差によって平行移動が生じていると考え

られる．また解域によってどの材質が最適であるかが大きく異なる．設計者はどの評価項目を重要とするか考え、客観的な根拠をもとに最適な材質を選ぶことができる．

D_1 , D_2 の変化を見ると、ともに最小値からはじまり徐々に D_1 が広がりはじめ、最大値に達すると同時に D_2 が広がっていき最終的にともに最大値を取る．これは最小肉厚を保ったままの変化が最適解とならないことを示す．

(4) 適用例④：固有角振動数

適用例①からの問題の拡張として新たに評価項目を加える．主軸の回転に起因する強制振動との共振をさけるため、ねじりの固有角振動数 ω を小さくすることを考える．

対象製品のモデルは適用例①と同一とし Fig. 2 のモデル図を用いる．左端と右端に取り付けられている円盤の慣性モーメントはそれぞれ I_{p1} [kg・m²], I_{p2} [kg・m²]とする．また変数や制約条件は適用例①と同じものを用いた．

a) 評価関数と各種設定値

評価項目は F_s , M_{total} , ω の3項目を取り上げる．以下には適用例①からの追加・変更点を記す．

F_s は適用例①と完全に同一であるため説明を割愛する．

C_{total} と E_{total} の各項目は質量に縛られることが多くある．また評価項目が増えたことでトレードオフ分析が困難となることを避けるため、2つの評価項目を M_{total} としてまとめることとする．

断面一様な中空円筒軸の両端に円盤が取り付けられた1自由度系のねじり振動の場合、固有角振動数 ω は円筒軸のねじりのばね定数 k [N・m/rad], 両端の円盤の慣性モーメント I_{p1} , I_{p2} より求まる． k はFig. 2におけるX軸に関する円筒軸の断面二次極モーメント I_p , 材質の横弾性係数 G , 軸の全長 L から求められ、 I_p は外径 D_1 , 内径 D_2 により決定される．最終的に F_s は以下の式より求まる．

$$\omega = \sqrt{\frac{\pi G}{32L} \left(\frac{1}{I_{p1}} + \frac{1}{I_{p2}} \right) (D_1^4 - D_2^4)} \quad (16)$$

左端と右端に取り付けられた円盤の慣性モーメント I_{p1} , I_{p2} はそれぞれ8 [kg・m²], 2.25 [kg・m²]とした．

その他の設定値については、Table 1 と同一である．

b) 結果

F_s の値が昇順になるよう各個体をソートしてインデックスを振り、変数の変化の様子をグラフ化したものをFig. 14に示す． F_s と M_{total} のパレート最適解をFig. 15に、 F_s と ω のパレート最適解をFig. 16に示す．炭素鋼における3つの評価項目のパレート最適解を3次元グラフにプロットしたものをFig. 17に示す．

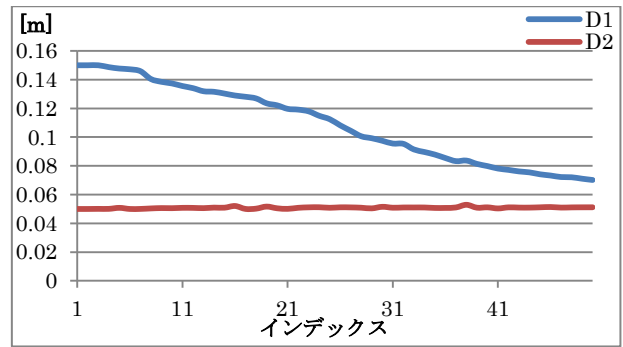


Fig. 14 Changes of design variables

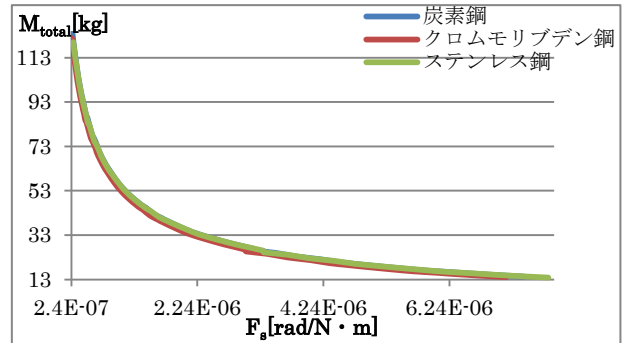


Fig. 15 Pareto optimum solution of F_s and M_{total}

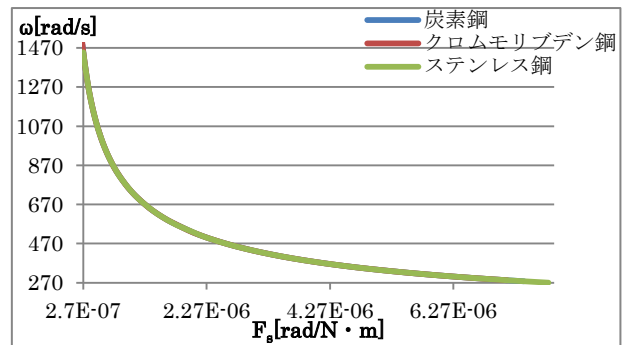


Fig. 16 Pareto optimum solution of F_s and ω

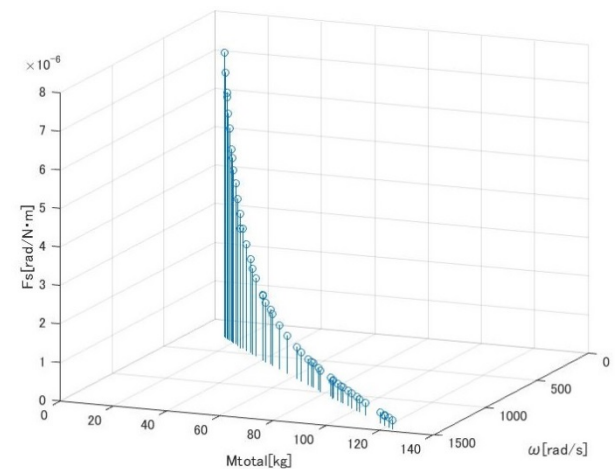


Fig. 17 Pareto optimum solution of 3 functions

M_{total} と ω は競合関係とはならなかった．これは(8)式と(16)式を見て分かるように、どちらの評価項目も

外径 D_1 と内径 D_2 の差を低くするほどより優れた評価値となることが要因である。しかし変数の次元がそれぞれ違っているため、比例関係とはなっていない。

各材質の結果を比較すると、 F_s と M_{total} のパレート最適解においては、クロムモリブデン鋼が最も優れた解を出している。これは適用例①や③と同様にクロムモリブデン鋼のGの値が効いているものだと考えられる。

F_s と ω のパレート最適解においては、各材質の結果にほとんど差がついていない。この2つの評価項目の値を決める定数のうち、材質によって変わるものは横弾性係数Gのみである。また(4)式と(16)式から分かるように、Gは F_s を構成する式には分母に、 ω を構成する式には分子に含まれている。つまりGが大きければ F_s の値が小さく ω の値が大きく、逆にGが小さければ F_s の値が大きく ω の値が小さくなる。したがって各材質のGの大小では最適解の優劣に差がつかずこのような結果になったと考えられる。

D_1 と D_2 の変化を F_s の昇順に見ると最大外径かつ最小内径からはじまり、単純に外径が最小値に達するまで縮むことで変化を終える。これは適用例③と同様に、本適用例では最小肉厚を保ったままの変化が最適解とならないことを示す。評価項目をひとつ追加ただけなのに対し、変数の変化の様子は大きく変わることが分かる。

5. 結論

製品のライフサイクル全体における環境影響を考慮しつつ、かつ経営的に持続可能なビジネス戦略との両立を可能とする製品モデルを導くため、製品性能やライフサイクルコスト、環境影響を定式化することで評価関数を定義し、GAによる多目的最適化を行うことでパレート最適解を導出するという手法を提案した。また、4つの適用例を例題としてケーススタディを行うことで、本手法の有効性について検証した結果、以下のような結論を得た。

- 製品性能やコストのみならず、環境影響の面から製品の設計案を定量的に評価することができた。これにより設計者が、製品性能、コスト、環境影響を同時に評価しながら意思決定を行うための指針が得られた。また、評価項目間の競合関係を詳しく分析することで、設計問題を支配している項目をより良く理解することができる。
- 材質の変更によって得られる設計解の改良について検討し、パレート最適解を改良するための方向性を考察することができた。この方向性は各種設計パラメータを改善するための研究開発の指針となり得る。
- 本研究では、製品性能としてねじりの静コンプライアンスやねじりの固有角振動数などを取り上げた。しかし、他に考慮すべき製品性能も多数ある。また、製品性能は対象とする製品によって中身が大きく異なってくる。したがって本手法の実行者は、製品性能に対する幅広い知識を持ち合わせ、それらを正確に定式化、または統合化することが必要になる。

- 本手法は、対象製品の構造解析および各種評価項目の定式化のため、実際の製品を単純化してモデルを設定する必要があるが、最適化後の詳細設計時には、最適化された設計変数の値を等価に満たすよう考慮しなければならない。
- 環境影響の評価において、MiLCAのデータベースの信頼性への疑問が残る。特に、MiLCAは基本的に質量単位でのデータ入力を受け評価を下すため、他のパラメータ変更による影響を加味していない。しかしこの問題は、実際に製品を設計する場合にはMiLCAを使わずとも詳細なデータが入手可能であり、他のパラメータについての定式化も可能であるため、信頼性は向上すると考えられる。
- MiLCAにより、鉄鋼材料をリサイクルするとかえって温室効果ガスが多く発生してしまうという結果が得られた。しかし、特性化の変更により、鉄鋼資源の消費についての環境評価を行えば、結果が逆転することが予想できる。全ての環境影響に対して考慮をするためには、各種特性化の統合に関する研究を進め、本手法の改良を行う必要がある。
- 本研究では、機械製品全体に対してではなく、機械製品を構成するひとつの部材についてのケーススタディを行ったため、使用の段階について評価を行うことが困難であった。しかし実際には、使用の段階でエネルギーを消費しながら目的を果たす機械製品が多く存在し、特に長期間使用されるほどその影響が多く出ることが考えられる。したがって、本手法を機械製品全体に対して適用した検証が必要である。
- 本手法は、多くの一般的な機械製品に対し有効であると期待されるが、その検証のためには、さらに多くのケーススタディを行う必要がある。

本研究を進行するにあたり、終始ご指導および御助言をして頂いた、指導教員であります法政大学理工学部機械工学科木村文彦教授に対して深く感謝の意を表すと共に、心より厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 梅田靖：インパースマニファクチャリングの考え方，エレクトロニクス実装学会誌，Vol.3，No.3，2000
- 富山哲男：循環型製品のライフサイクル設計，東京大学人工物工学研究センター
- 中上義幸，土井健志，吉村允孝，西脇眞二，泉井一浩：長期間使用される機械製品の最適ライフサイクル設計法，日本機械学会論文集，C編，Vol.74，No.748，2008
- 稲葉敦，青木良輔，井坪徳宏，田原聖隆，成田暢彦：LCAシリーズ，LCA概論，産業環境管理協会，2007
- 目時伸哉：遺伝的アルゴリズムGA入門，遺伝的アルゴリズムを用いたテストケースの生成，キャッツ組込みソフトウェア研究所，2009
- 清家政一郎：工学基礎，材料力学，共立出版，1997